防蝕工程　第二十四卷第四期　第 245 ~ 254 頁　2010 年 12 月
Journal of Chinese Corrosion Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 245 ~ 254 (2010)

老舊熱風爐設備適用性評估

吳興練*[1]、張茂林[2]、陳國銘[1]

Fitness Assessment on a Used Hot Blast Stove

Hsing-Lien Wu*[1], Mao-Lin Chang[2], Kao-Min Chen[1]

Received 20 August 2010; received in revised form 26 November 2010; accepted 10 December 2010

摘　要

本文說明某熱風爐舊設備的再適用性，該熱風爐已運轉滿 32 年後將進行更新，爲了節省成本，將保留蓄熱室胴體殼板爲設備更新的一部分。中鋼腐蝕測試中心對熱風爐胴體殼板作劣化與再用狀況評估，作爲採取維修措施的依據。研究試驗結果顯示，依據 API579 計算各區殼板所需的最小厚度，遠小於實際厚度；最大容許工作壓力 MAWP 約爲設計壓力的 3 倍以上。經歷 32 年的使用，殼板主要的腐蝕劣化型態爲局部腐蝕、熱點與應力腐蝕，殼板減薄量少，仍有很長的使用壽命。舊殼板、銲道與新殼板的疲勞限度遠大於膜應力，適用於疲勞的環境。並可依據裂紋穩定成長方程式，估算它的裂紋成長速率。

關鍵詞：熱風爐；適用性；疲勞。

ABSTRACT

This article describes the fitness of a used hot blast stove. The hot blast stove had been used for 32 years, and a renovation was to be implemented. For saving the cost, the checker chamber of the shell will be retained as part of the renovated equipment. In order to establish a maintenance basis, China Steel Corrosion Test Center evaluated the degree of deterioration and the residual life of the hot blast stove. Test results showed that the actual thickness of each zone of the checker shell estimated from API579 was much larger than the minimum required thickness. The maximum allowable working pressure based on its current thickness was approximately more than three times the designed operating pressure. After a 32-year service, it was found that the corrosion forms of the checker shell included localized corrosion, hot spot cracking, and stress corrosion cracking. Thinning of the checker shell was not significant, and the continuing service life was expected to be very long. The fatigue stress thresholds of the old plate, the weld bead, and the new plate were all higher than that of the operating membrane to be used in the renovated hot blast stove. They were therefore suitable to be used in fatigue environments. In case of a crack, its growth rate may be estimated from a theoretical crack growth equation.

Keywords: Hot blast stove; Fitness; Fatigue.

1 中鋼公司鋼鐵研究發展處
1 Steel and Iron R & D Dept., China Steel Corporation
2 中鋼公司煉鐵廠
2 Iron Making Plant, China Steel Corporation
* 連絡作者：t113@mail.csc.com.tw

1. 前言

某鋼廠的某熱風爐(Hot Blast Stove. HS)運轉 32 年後，將進行更新。熱風爐的組成大略分爲燃燒室(Combustion Chamber)、圓頂(Dome)與蓄熱室(Checker Chamber)，更新時會拆除燃燒室與圓頂，但保留蓄熱室胴體殼板爲設備更新的一部分，以節省成本，加快工程速度。爲了確保下一個 30 年的熱風爐運轉安全，對蓄熱室胴體殼板作劣化與再用狀況評估，作爲採取維修措施的依據。本計畫的工作項目爲：(1) 熱風爐蓄熱室胴體殼板腐蝕劣化檢查；(2) 熱風爐蓄熱室胴體殼板之厚度、潛變與疲勞適用性評估，以期建立老舊設備適用性評估模式。

2. 實驗方法

2.1 設備介紹

熱風爐係提供高爐熱鼓風的設備。熱風爐的主要構造如圖 1，熱風爐的組成大略分爲燃燒室、圓頂與蓄熱室。熱風爐的操作約略可分爲蓄熱與放熱二階段。蓄熱時以高爐爐頂氣(Blast Furnace Gas, BFG)爲燃料在燃燒室燃燒，高溫廢氣經圓頂進入蓄熱室，加熱蓄熱磚後由煙囪排放。放熱時冷鼓風由蓄熱室底部進入，接收蓄熱磚的熱量變成熱鼓風，經圓頂進入燃燒室上方的鼓風管送到高爐。採四座熱風爐交替操作模式，輪流送熱空氣到高爐。熱風爐內氣體爲 BFG 燃燒廢氣，或更替的熱空氣，含有 NOx、SOx 等腐蝕因子。鼓風溫度約 1150 °C。蓄、放熱循環操作時，熱風爐壓力變化約從 0.01 MPa 到 0.42 MPa。當換爐時，膨脹管受力而膨脹，以承受蓄熱室與燃燒室間之不同拉長差，如同吹氣球膨脹、收縮，約 90 分鐘/循環。

熱風爐內部充滿耐火磚、蓄熱磚等，要實施內部檢查難度極高；因此，熱風爐通常只做外部目視檢查，以及用紅外線量測爐體外部的板溫，尋找『熱點』，由熱點來研判內部耐火磚等是否剝離、脫落。現場殼板外部板溫檢查結果顯示晴天風速大(4 m/sec)與風速小(2 m/sec)的板溫約相差 10 °C，溫度分布在 70 ~ 90 °C 之間，圓頂與燃燒室的板溫約比蓄熱室的板溫高出 10 °C。歷經 32 年的操作，熱風爐殼板大致上完好，僅在燃燒室發現 2 條軸向裂紋(圖 2)，以及外殼部分脫漆腐蝕的現象。殼板外部主要是受環境氣候影響所產生的大氣腐蝕、局部腐蝕現象，其結果將造成殼板減薄或局部減薄。熱風爐內襯材如果鬆脫，局部殼板即會出現熱點，或受爐內高溫氣氛影響，會有高溫腐蝕、潛變等現象。同時蓄、放熱循環操作在殼板的表面缺陷處，因局部應力集中，如誘發裂紋起始，在循環操作應力作用下，裂紋漸次疲勞成長破穿殼板。因此，以殼板減薄、潛變與疲勞爲探討殼板劣化課題，分別檢測、試驗並評估殼板的適用性。

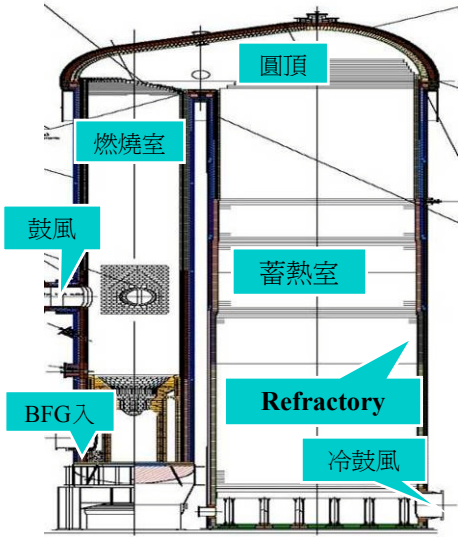


圖 1　熱風爐的簡介。

Figure 1　Schematic of the hot blast stove.

圖 2　熱風爐燃燒室胴體外觀。

Figure 2　Observation of the combustion chamber of the hot stove.

2.2 現場檢查

2.2.1 殼板之厚度及腐蝕狀況與缺陷檢查

以目視檢查殼板，確認殼板腐蝕狀況，尋找缺陷與熱點，如有外觀異常再研擬進一步的詳細檢查方法，包含腐蝕目視檢測、腐蝕生成物採樣分析與非破壞檢測。非破壞儀器檢測可檢查目視看不到的缺陷，腐蝕生成物採樣分析可了解腐蝕環境與腐蝕因子。

2.2.2 殼板銲道之檢測

經過 32 年的使用，銲道最容易產生缺陷。因此，蓄熱室欲保留的部分全部進行銲道詳細檢測。原來規劃用液滲檢測(Liquid Penetrate Testing，PT)，實際執行時發現銲道高低起伏，表面粗糙，氣孔與夾渣多，表面附著物與銹皮很難清理。因此改用對被檢物表面之前處理要求並不高的磁粒檢測(Magnetic Particle testing，MT)，電流之流動會使鐵磁性材料內部產生磁力線，當被檢物之表面或次表面有裂縫存在時，磁力線將被推擠而跳出被檢物表面，此謂之磁漏。在磁漏處施加鐵粉，則鐵粉會被漏出於外之磁力線所吸附而成形顯示。

2.3 實驗室試驗

2.3.1 腐蝕機構－腐蝕生成物分析

現場檢測時，採取設備胴體之腐蝕生成物樣品，研磨成粉末，分別以掃描式電子顯微鏡(SEM)結合能量散佈光譜儀(EDS)分析其可能元素種類，並以 X 光繞射儀(XRD)分析其組成(Cu Kα，λ= 1.5406 A)，繞射範圍 15～90°，掃描速度 2 °/分鐘。從分析之結果，研判設備腐蝕原因及可能之腐蝕因子，做爲判斷腐蝕型態與劣化原因之參考。綜合現場檢測與腐蝕生成物取樣分析結果，比對設備基本資料與操作履歷，研判其腐蝕、劣化型態與原因。

2.3.2 殼板拉伸試驗(含銲道)

拉伸試驗方法依據 CNS 2111 標準，分別測試材料的降伏強度、抗拉強度與伸長率。拉伸試片的製作依據 CNS 2111 標準的 5 號試片來加工，如果是銲道的拉伸試片，則將銲道部分安排爲 5 號試片的標點距離的部分，蓄熱室的取樣位置如圖 3。

2.3.3 殼板材料金相試驗

依照圖 3 蓄熱室的取樣位置，截取殼板截面樣品。經樹脂包埋、研磨、拋光、浸蝕後，分別利用光學顯微鏡(OM)來觀察及分析金相組織，以瞭解材質是否劣化。

2.3.4 沙丕衝擊試驗(Charpy Impact Testing)

依據 CNS 2111 標準，使用沙丕衝擊試驗機(Tinus Olsen Testing Machine Co. No 129445)，將試片置於兩個相隔 40 mm 之支持台上，並將 V-Notch 凹口置於支持台間之中央，以擺鎚衝擊 V-Notch 凹口之背面，一次擊斷，以測定吸收能量與轉脆溫度之試驗。V-Notch 凹口爲垂直鋼板長度方向的厚度截面。

2.3.5 殼板疲勞 S-N 曲線

試驗依據 CNS 7375 標準，使用 100 kN 動態材料試驗機(MTS 810 Material Test System，國科企業)，

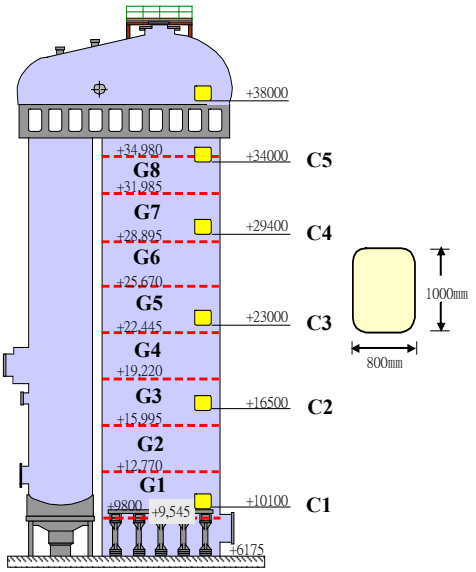


圖 3　蓄熱室殼板分析取樣位置。

Figure 3　Sampling positions of the checker chamber.

試驗試棒爲 d = 6 mm 的 1 號試棒，採用軸向力控制。爲了讓試棒不要有壓應力出現，以拉—鬆型式進行，應力比 R ＝ 0.05，頻率爲 15 Hz 之正弦波，在不同的最大應力值下測試，直到試棒破斷爲止。由應力振幅(S)和循環次數(N)之間的關係，可求出 S - N 疲勞曲線，並以 10^7 循環數爲實驗終止的循環數。由於殼板外觀觀察時發現裂紋出現於胴體軸向，且位於銲道鄰近區域，因此，拉伸試驗與衝擊試件取周向，試棒斷面會比較符合殼板裂紋的實際情況。

2.3.6 殼板疲勞裂紋成長曲線

試驗依 ASTM E647，使用 100 kN 動態材料試驗機(MTS 810 Material Test System，國科企業)，疲勞裂縫成長試驗主要分成兩個步驟進行，首先爲疲勞預裂，再進行裂縫延伸。使用裂縫開口位移量規(Crack Opening Displacement(COD) gage)計算裂縫的延伸量，執行 15 Hz 正弦波，應力比 R = 0.1 之循環負荷。

2.4 適用性評估：厚度、潛變與疲勞

2.4.1 厚度--API 579 設備剩餘壽命評估

(1) 勞委會的觀點

設備材質厚度必須符合厚度管理原則，即設備材質厚度必須大於 t_{min} 最小需求厚度，無變形疑慮，且屬於均勻減薄的腐蝕劣化型態。計算公式如式(1)；

$$RL=(t_{am}-t_{min})/CR \quad (1)$$

t_{am}：量測平均厚度

RL：Remaining Life (剩餘壽命)

CR：Corrosion Rate (腐蝕速率)

(2) API 579 均勻腐蝕設備剩餘壽命評估

(A) 以設備材質厚度計算

$$R_{life}=\frac{t_{am}-Kt_{min}}{C_{rate}} \quad (2)$$

R_{Life}＝剩餘壽命

C_{rate}＝腐蝕速率

K =因素；Level 1 評估時，K = 1.0；

Level 2 評估時，壓力容器與管線

K = RSF_a，儲槽殼板 K = 1.0。

RSF_a = 容許剩餘強度因素(0.9)

圓柱體爲

$$\text{周向}\quad t^C_{min}=\frac{PR_C}{SE-0.6P} \quad (3)$$

$$\text{軸向}\quad t^L_{min}=\frac{PR_C}{2SE+0.4P}+t_{sl} \quad (4)$$

$$t^C_{min}\ =\text{取}(t^C_{min},\ t^L_{min})\text{的最小值} \quad (5)$$

t_{sl} 爲基於軸向應力，附加負載所需的厚度，若無，可爲零。

P＝內部設計壓力

S=材料的 TS(Tensile Strength)

E＝銲接效率，E=0.85

$$R_C=R(\text{內部半徑})+Loss+FCA \quad (6)$$

$$Loss=t_{nom}-t_{min} \quad (7)$$

t_{nom}=標稱厚度

通常周向的厚度需求遠大於軸向的厚度需求，設計上的安全考量，最小需求厚度宜採用周向的厚度需求。

(B) 計算最大容許工作壓力 MAWP

圓柱體爲

$$\text{周向}\quad MAWP^C=\frac{SEt_C}{R_C+0.6t_C} \quad (8)$$

$$\text{軸向}\quad MAWP^L=\frac{SE(t_C-t_{sl})}{R_C-0.4(t_C-t_{sl})} \quad (9)$$

t_{sl} 爲基於軸向應力，附加負載所需的厚度，若無，可爲零。

$$t_C=t_{nom}-Loss-FCA \quad (10)$$

FCA = 未來腐蝕裕度

t_{nom}＝設備標稱厚度

工作壓力不大於最大容許工作壓力時，設備是安全的。

$$MAWP=\text{取}(MAWP^C,\ MAWP^L)\text{的最小值} \quad (11)$$

通常，軸向的最大容許工作壓力 MAWP 遠大於周向的最大容許工作壓力 MAWP，設計上的安全考量，最大容許工作壓力 MAWP 宜採用周向的最大容許工作壓力。

(C) 計算殼板膜應力

圓柱體

$$\text{周向}\ \sigma^c_m=\frac{P}{E}\left[\frac{R}{t_c}+0.6\right] \quad (12)$$

$$\text{軸向}\ \sigma_m^L = \frac{P}{2E}\left[\frac{R}{t_c - t_{sl}} - 0.4\right] \qquad (13)$$

周向的殼板膜應力遠大於軸向的殼板膜應力，設計上的安全考量，殼板膜應力宜採用周向的殼板膜應力。

2.4.2 潛變評估

固體中的原子並非處於靜止狀態，而是在分子或晶體的位置上永久振動。當材料在溫度 T 高於 0.5 Tm (Tm：材料熔點溫度，K)的環境下，原子振動的動能將增大，導致鍵結變弱，即原子振動所產生之動能會導致原子間距離增大，使得個別原子跳離原來的低能量位置的機率增大，此即材料空孔(Vacancies) 缺陷之形成。潛變即依據 Isolated Cavities、Oriented Cavities、Micro-Crack、Macro-Crack 的金相趨勢來評估。

2.4.3 疲勞評估

比靜破壞(Static Fracture)還要小的負荷，實施反覆作用所引起的滑移變形起始，裂紋的發生、進展，伴隨著裂紋進展，從斷面減少走向靜的最終破壞。疲勞評估依據應力振幅(S)和循環次數(N)之間的 S-N 疲勞曲線，以及裂紋成長速率來評估。

3. 結果與討論

3.1 設備之基本資料分析

熱風爐由 PW 公司設計，依據原設計規範計算殼板厚度等數據以及最終採用的殼板厚度如表 1。

表 1. 熱風爐的設計資料。

Table 1 Design data of the hot stove.

項目	動態計算	靜態計算
操作年限(年)	30	30
操作循環次數	180,000	180,000
設計壓力(MPa)	0.421	0.421
操作壓力(MPa)	0.35	0.35
蓄熱室板厚 mm	16.71	12.92
蓄熱室實際板厚	19 mm	
備註	* (D) 8500 mm，SB450M，板溫 150 °C	

蓄熱與放熱循環，以靜態、動態狀況模擬計算。操作循環次數以 90 分鐘/循環，350 天/年，30 年大約操作了 168,000 循環，以 18 萬次計算；在最大的操作壓力 0.35 MPa 下，動態狀況模擬計算蓄熱室殼板所需厚度為 16.71 mm，靜態狀況模擬計算蓄熱室殼板所需厚度為 12.92 mm，而殼板實際的採用厚度為蓄熱室 19 mm。取動、靜態狀況模擬二者的平均值計算，蓄熱室殼板所需厚度約為 14.82 mm，約有 4 mm 的腐蝕裕度。在完善的防蝕保護狀況下，4 mm 應該足夠，但如有局部腐蝕、熱點的情形，引發殼板表面缺陷造成局部應力集中之 SCC(應力腐蝕破裂)，就難以避免有破損的情形發生了。因此，殼板表面的隔熱、防蝕保護很重要。

3.2 蓄熱室現場檢查與實驗室試驗結果

目視檢查結果顯示，殼板外壁塗裝保護良好，內壁表層塗覆耐火泥，除去耐火泥，內壁表面呈現點銹局部腐蝕，銲道區較為明顯(圖 4)。由表 2 厚度量測結果來看，鋼片剩餘厚度仍有 19 mm，僅有些表面點銹，減薄狀況極輕微，以減薄的速率來看，仍可使用很長一段時間；同時也說明了，蓄熱室殼板表面原來的隔熱、防蝕保護措施，能適用熱風爐的操作狀況與使用環境。緊接著的檢查重點，放在尋找保留部分殼板的銲道上。將銲道及其兩邊 15 cm 可能的熱影響區範圍，進行表面研磨後以 MT 來檢測。檢查結果發現，在殼板上層 G8 ~ G7 間的銲道找到 3 處裂紋缺陷 (圖 4(h) ~ (j))，分別編號為 G8W、G8S 與 G8E。意指 G8 ~ G7 間銲道的西、南與東方

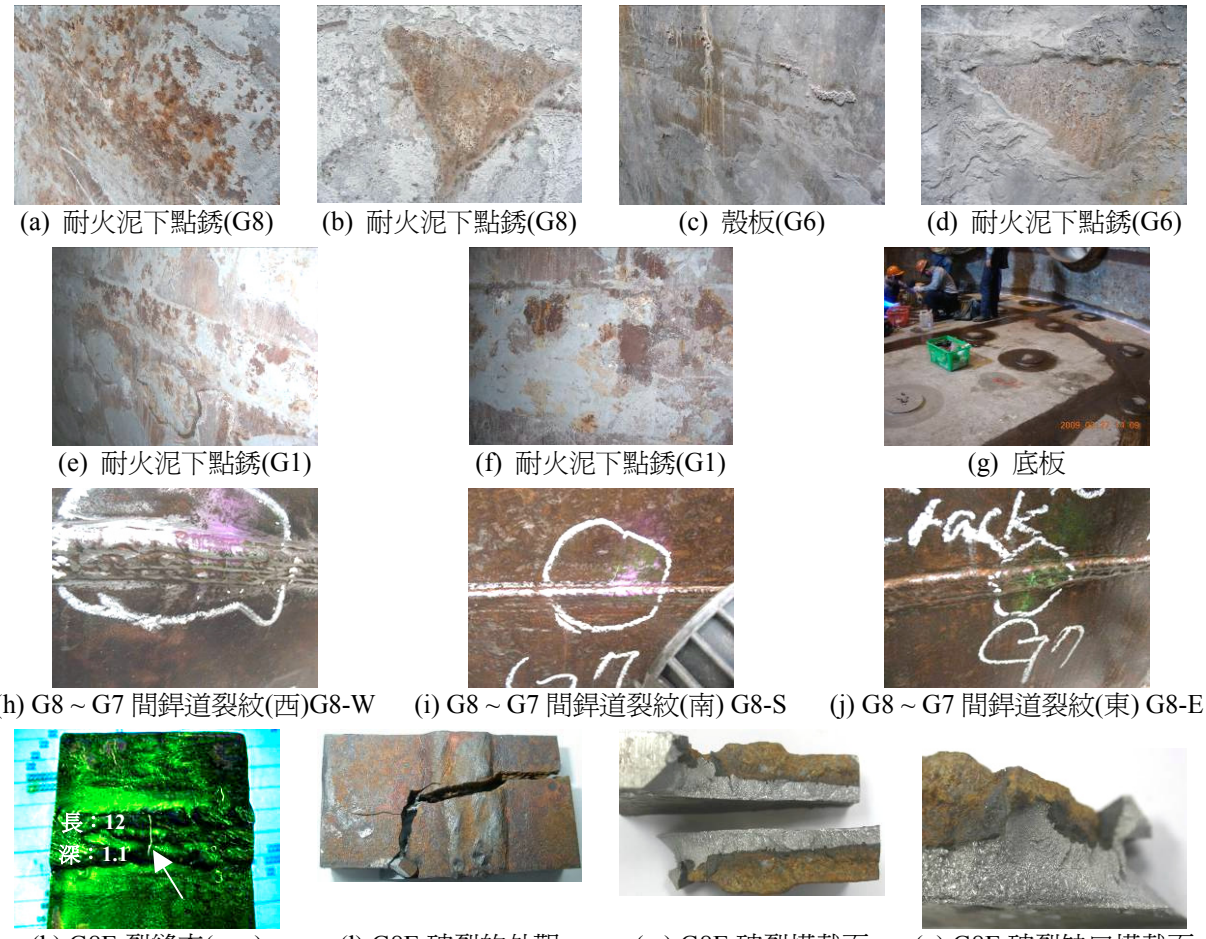
表 2. 蓄熱室壁厚度與壽命評估。

Table 2 Shell thickness and remaining life evaluation of the checker chamber

設備名稱	蓄熱室
測厚位置(材質)	殼板，SB450M
新建時壁厚(mm)	19
更新前壁厚 t(mm)	19
腐蝕速率 C_{rate}(mm/Yr.)	0
最小需求厚度 t_{min}(mm)現場	16.7
R_{life}(Yr.)	∞
備註	* 應力腐蝕破裂，殼板熱點。

向各發現 1 裂紋缺陷位置。裂紋皆呈現雞爪狀，銲道上裂紋有軸向，也有周向裂紋。將裂紋處區殼板切下，進一步以電位差裂縫測深儀測量，其裂縫深度及位置標示如圖 4(k)。取 G8E 裂紋區塊浸漬液態氮冷凍，並迅速用重錘將他強力敲開(圖 4(l) ~ (n))，爐殼板內壁面上的裂紋呈現鷄爪狀，壁板橫截面很清楚分爲棕色區與金屬色區，金屬色區爲橫截面無腐蝕與劣化的部分，棕色區應爲腐蝕、劣化影響的範圍。由此看，殼板裂紋深度不一，最深約可達 14 mm(殼板厚度的 2/3)。橫截面酸洗後的外觀如(圖 4(n))，近內壁邊緣破斷面的外觀高低凹凸，傾向腐蝕影響的現象。由於裂紋分布在銲道上，而銲道凹凸不平且有腐蝕現象，研判爲腐蝕與銲接缺陷所造成的應力腐蝕裂紋。應力應來自熱應力與操作應力，因溫度梯度不大，操作應力應遠低於材料的破壞應力，30 年的時間裂紋成長很慢，仍未破穿，顯示殼板受腐蝕與應力影響的速率緩慢。

現場檢測時，採取蓄熱室胴體殼板之腐蝕生成物樣品，研磨成粉末，以掃描式電子顯微鏡(SEM)結合能量散佈光譜儀(EDS)分析其可能元素種類，並以 X 光繞射儀(XRD)分析其組成。評估結果顯示從頂部 G8 至底部 G1 環胴體(典型分析結果如圖 5)，其腐蝕生成物主要的元素組成爲 Fe、O、Si、Al，以及 S、Ca、K 等微量元素，大概爲殼板氧化物與耐火泥的組成元素；主要的腐蝕生成物組成爲 FeOOH，無其他外界腐蝕因子入侵。腐蝕情況輕微，



(a) 耐火泥下點銹(G8)　(b) 耐火泥下點銹(G8)　(c) 殼板(G6)　(d) 耐火泥下點銹(G6)

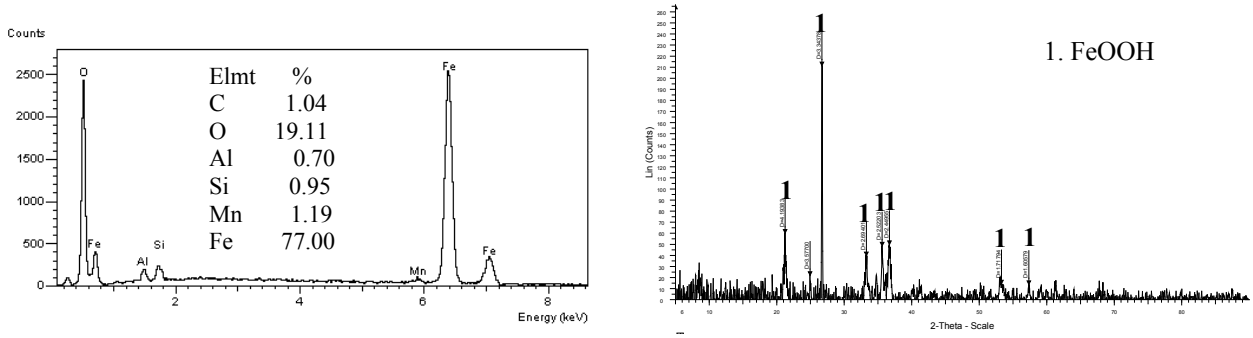
(e) 耐火泥下點銹(G1)　(f) 耐火泥下點銹(G1)　(g) 底板

(h) G8 ~ G7 間銲道裂紋(西)G8-W　(i) G8 ~ G7 間銲道裂紋(南) G8-S　(j) G8 ~ G7 間銲道裂紋(東) G8-E

(k) G8E 裂縫查(mm)　(l) G8E 破裂的外觀　(m) G8E 破裂橫截面　(n) G8E 破裂缺口橫截面

圖 4　蓄熱室內壁腐蝕與裂紋檢查。

Figure 4　Various corrosion locations in the checker chamber.



(a) SEM/EDS 分析結果　　(b) XRD 分析結果

圖 5　G1 環內壁腐蝕生成物分析。

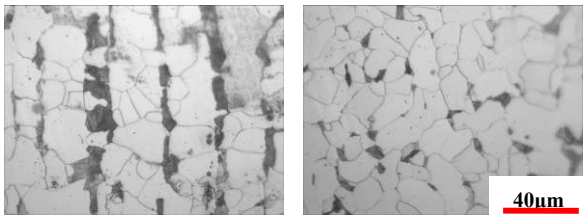
Figure 5　SEM/EDS and XRD analyses on the corrosion products on the G1 tier inner surface.

腐蝕型態爲水氣影響的腐蝕，這些水氣有可能爲引進空氣加熱成熱鼓風所帶進來的，少許水氣已滲透到殼板內壁，並引起銹點。

蓄熱室胴體殼板之拉伸試驗結果如表 3，降伏強度皆大於 255 MPa、伸長率皆大於 23 (%)，符合 JIS G3103 SB450M 之規範。但是抗拉強度稍嫌不足，接近 450 MPa 下限，甚至 C5 位置(G7 ~ G8 環)的抗拉強度僅 400 MPa，已經明顯不足。

由於該殼板已經運作 30 多年，爲釐清當初的機性是否偏低，於是進一步分析其金相組織，如圖 6。圖 6(a)是正常的 SB450M 金相組織爲肥粒鐵+波來鐵組織，但圖 6(b)橫截面金相無層狀的波來鐵組織，碳含量較低，波來鐵組織較少，以致其抗拉強度較低。

本次更新後，未來的 30 年都不會做內部檢查；因此，將 G8 整圈殼板切除重作，確保未來使用安全無虞；同時在殼板做好以後，內壁會全面噴砂表面



(a)　　(b)

圖 6　蓄熱室殼板的金相。

Figure 6　Optical micrographs of the cross-sectional surface of the checker chamber shell.

處理、防蝕塗漆後，再塗覆耐火泥等，對內壁的防蝕保護應會比 32 年前更好。

3.3 適用性評估：厚度、潛變與疲勞

3.3.1 厚度與 API579 適用性評估

熱風爐壁厚度與壽命評估如表 4，雖然已經使

表 3.　蓄熱室殼板拉伸試驗結果。

Table 3　Tensile test results of the checker chamber.

取樣位置	降伏強度(MPa)	抗拉強度(Mpa)	伸長率(%)
C5	280	405	52
C4	265	445	54
C3	302	468	46
C2	295	450	47
C1	292	448	48
新板	318	525	44
SB450M	255 min.	450 ~ 590	23 min.

用了 32 年，蓄熱室殼板幾乎無減薄，殼板厚度距離 PW 公司依據原設計規範計算的殼板最小需求厚度(14.82 mm)仍有 4 mm 以上的距離，如殼板的腐蝕速率不變，並以均勻腐蝕型態考量，殼板仍有 32 年以上的使用壽命。

依據 API 579 計算殼板最小需求厚度、最大容許工作壓力與殼板膜應力，並估算均勻腐蝕的設備剩餘壽命如表 4。熱風爐設計壓力為 0.41 MPa，在此壓力下，依據 API579 計算殼板所需的最小厚度為 4.7 mm，遠小於實際厚度(19 mm)，也遠小於設計規範計算的殼板最小需求厚度(14.82 mm)。蓄熱室殼板的 MAWP 最小為 1.49MPa，為設計壓力(0.41 MPa)的 3 倍以上，設備剩餘壽命很長，安全係數頗高。但是，殼板膜應力為 126 MPa，此膜應力對應舊殼板 250 MPa 以上的降伏強度，應有 2 倍的安全係數，新殼板的降伏強度達 318 MPa，安全係數可再提高一點。但是，如果殼板有表面缺陷，將導致局部應力集中，缺陷尖端應力將會超過殼板的降伏強度，表面缺陷將引發裂紋延伸而使殼板破損。設備建造時，宜注重殼板的防蝕保護，以及銲接等的表面品質。

3.3.2 潛變評估

潛變為溫度-應力-時間的函數，從圖 6 金相分析結果顯示，蓄熱室胴體殼板金相，都呈現正常的肥粒鐵與波來鐵組織。對照潛變趨勢說明圖，研判尚無潛變問題，顯示蓄熱室內的耐火隔熱措施，適於該操作環境，殼板可免於爐內高溫的影響。

表 4.　蓄熱室最小需求厚度計算(API 579)。

Table 4　Minimum required thickness of the checker chamber calculated by API579.

材質	殼板 SB450M
材質應力 (舊-新 TS(MPa))	400 ~ 525
設計壓力(MPa)	0.42
胴體形狀外徑(mm)	圓柱，8538
FCA(mm)	2.3
Loss (mm)	0
C_{rate}(mm/Yr.)	0
t^{C}_{min}(mm)	4.7
$MAWP^{C}$(MPa)	1.49
σ_m (MPa)	126

3.3.3 疲勞評估

(a) 沙丕衝擊試驗

在進行疲勞試驗之前，先取舊殼板進行沙丕衝擊試驗，其結果如表 5。常溫下(24 °C)，舊殼板 L 向吸收能約為 120 J，T 向吸收能約為 80 J；0 °C 時，舊殼板 L 向吸收能約為 115 J，T 向吸收能約為 70 J。由此測試結果可判定在 0 °C 時，殼板並未出現轉脆現象，它的破壞會是延性破壞，適合於疲勞試驗進行的前提，以探討其疲勞特性。由舊殼板斷裂面研判，疲勞裂紋成長試驗試片的開槽應有 T 向與 L 向之分，因為 T 向開槽衝擊值較低，在疲勞裂紋成長試驗時，採試片採 T 向開槽為判定標準。

(b) 殼板疲勞 S-N 曲線

在進行疲勞試驗之前，刻意地對試驗材再做一次拉伸試驗，取樣對象為蓄熱室保留部分的殼板、銲道與現場提供的新板。現場檢查時看到的是軸向裂紋，因此，殼板與新板試樣取周向(剛好是軋延方向)，與之前的拉伸試驗同方向；銲道試樣取舊殼板周向的水平銲道，拉伸試驗結果如表 6。舊殼板降伏強度(YS)約為 300 MPa，抗拉強度(TS)約為 470 MPa，伸長率約為 47 %；新板降伏強度為 318 MPa，抗拉強度為 525 MPa，伸長率約為 44 %；舊殼板銲道降伏強度約為 320 MPa，抗拉強度約為 475 MPa，伸長率為 14 ~ 17 %。

依據表 6 的試驗結果作為規劃疲勞試驗應用應力的參考，應力循環數規劃做到 10^7 次(一千萬次)，並以 10^7 次的循環應力做為該材料的疲勞限度。熱風

表 5.　蓄熱室殼板衝擊試驗結果(單位 Joule)。

Table 5　Impact test results of the checker chamber shell (unit: Joule).

取樣方向＼試驗溫度		24 °C	0 °C
舊殼板 L 方向軋延方向	1	126	122
	2	130	116
	3	110	113
舊殼板 T 方向垂直軋延方向	1	80	70
	2	84	72
	3	80	---

爐下一個 30 年的操作循環數約 16.8 萬次，一般認爲 10^6 次(一百萬次)循環即可，10^7 次可比喻成永不疲勞破裂的意義。疲勞 S-N 曲線試驗結果如圖 7，舊殼板與新殼板的 S-N 曲線圖上，落點趨勢性很好，但銲道的 S-N 曲線圖上落點就稀少許多，不是銲道試樣少，而是銲道試樣失敗率高，原來準備的試樣不敷使用，且無再取樣的機會，以致 S-N 曲線的落點稀疏。推測銲道是不均質的部分，銲接的氣孔、夾渣等缺陷可能會使試樣容易拉斷，導致落點偏離 S-N 曲線。疲勞 S-N 曲線試驗結果顯示，舊殼板、舊殼板銲道與新殼板的疲勞限度分別爲 320、340 與 380 MPa，大於 0.7 TS 值(一般的要求爲 0.45 ~ 0.55 TS 以上即可)，且遠大於膜應力(126 MPa)，顯示舊殼板、舊殼板銲道與新殼板機性很好，適用於可能疲勞的環境。實際應用上，耐疲勞性與表面品質有關，表面粗糙、有缺陷，疲勞限度就會降低；平滑的表面其疲勞限度最大。

(c) 殼板疲勞裂紋成長曲線

蓄熱室保留部分的殼板與新板的裂紋成長速率曲線依據 Paris 法則

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \qquad (14)$$

分別求出裂紋穩定成長期的方程式如下：

- 新料 T-L 向裂縫延伸曲線：

$$da/dn = 5.134\times10^{-10}(\Delta K)^{3.7997} \qquad (15)$$

- 新料 L-T 向裂縫延伸曲線：

$$da/dn = 4.079\times10^{-10}(\Delta K)^{3.8833} \qquad (16)$$

- 舊料 T-L 向裂縫延伸曲線：

$$da/dn = 1.425\times10^{-9}(\Delta K)^{3.5672} \qquad (17)$$

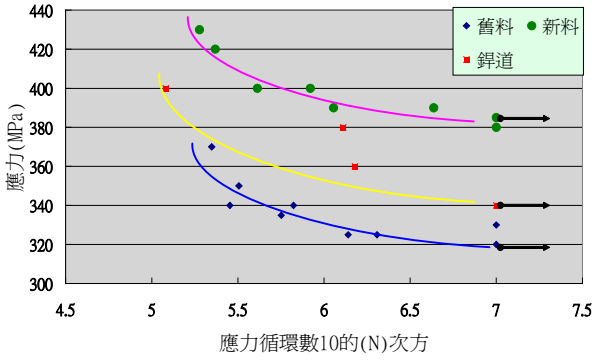


圖 7 蓄熱室殼板疲勞 S-N 曲線。

Figure 7 S-N curves of the checker chamber shell samples after fatigue tests.

- 舊料 L-T 向裂縫延伸曲線：

$$da/dn = 1.0579\times10^{-9}(\Delta K)^{3.677} \qquad (18)$$

新、舊料 L-T 向與 T-L 向的裂紋成長速率接近，但是舊料的裂紋成長速率約比新料快 1.5 倍。

$$\Delta K=(K_{max}-K_{min})=(\sigma_{max}-\sigma_{min})\sqrt{\pi a}\cdot F \qquad (19)$$

設 $K_{min}=0$，

$$\Delta K=(K_{max})=(\sigma_{max})\sqrt{\pi a}\cdot F \qquad (20)$$

F 爲形狀因素

由現場檢查得知，殼板破裂型態爲內壁軸向的裂縫，可採用圖 8 的模式[1]，以

$$K_I = \sigma(\pi a)^{1/2}f(a/b) \qquad (21)$$

方程式來計算裂紋前端的 K 值。如果已經發現裂紋了，可依據 Paris 法則之裂紋穩定成長方程式，估算它的裂紋成長 da/dn (mm/cycle)，即可推算破裂速率，如表 7。裂紋容許深度通常會以最小需求厚

表 6. 蓄熱室殼板的拉伸試驗結果。

Table 6 Tensile test results of the checker chamber shell.

取樣位置		降伏強度(MPa)	抗拉強度(MPa)	伸長率(%)
Checker 保留殼板銲道	1	327	473	17.0
	2	314	475	14.8
	3	329	475	14.8
Checker 保留殼板母材	1	305	465	47
	2	302	470	47
	3	302	468	46
新板		318	525	44
SB450M		255 min.	450 ~ 590	23 min.

表 7.　ΔK 與 da/dN(mm/cycle)的對應值。

Table 7　ΔK vs. da/dN (mm/cycle) calculated from the fatigue crack growth equation.

LnΔK(MPa-m$^{1/2}$)		2.5	2.75	3	3.25	3.5
ΔK(MPa-m$^{1/2}$)　K＝σ(πa)$^{1/2}$f(a/b)		12.18	15.64	20.09	25.79	33.12
da/dN (10^{-5} mm/cycle) 10 萬次循環，約 15 年	新料 T-L 向	0.671	1.77	4.68	12.35	32.6
	新料 L-T 向	0.713	1.83	4.77	12.3	31.87
	舊料 T-L 向	1.039	2.61	6.53	16.38	41.07
	舊料 L-T 向	1.064	2.60	6.33	15.45	37.68

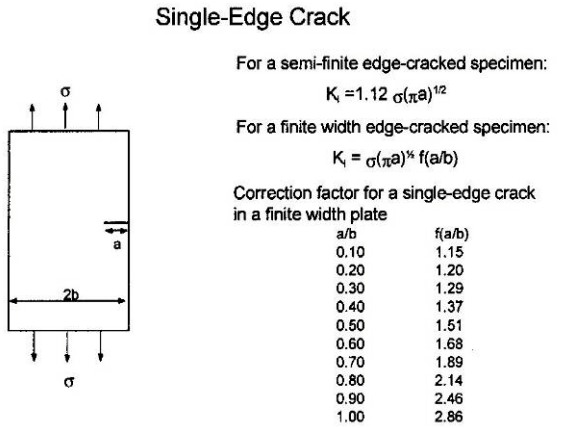


圖 8　裂紋前端的 K(Stress intensity factor)值。

Figure 8　Stress intensity factor of at the tip of a single-edge crack opening.

度(t_{min})或殼板厚度的一半爲參考值，減緩破裂速率最常用的方法就是降載操作。

4. 結論

綜合現場檢查殼板之厚度及腐蝕狀況與缺陷檢查、金相檢查、腐蝕生成物分析、殼板拉力試驗與疲勞試驗結果顯示：殼板原來的隔熱保護措施良好，僅有有些熱點與局部腐蝕，殼板減薄量極微小。蓄熱室殼板上層 G8 ~ G7 間的銲道有 3 處裂紋缺陷，裂紋皆呈現雞爪狀，裂紋方向爲由內壁銲道往外延伸；研判胴體殼板破裂的機構爲應力腐蝕破裂。金相都呈現正常的肥粒鐵與波來鐵組織，無潛變問題。

舊殼板、舊殼板銲道與新殼板的疲勞限度分別爲 320、340 與 380 MPa，大於 0.7 TS 值，且遠大於膜應力，顯示舊殼板、舊殼板銲道與新殼板機性很好，適用於可能疲勞的環境。新板的裂紋成長方程式新料 L-T 向爲 $da/dn = 4.079\times10^{-10}(\Delta K)^{3.8833}$，舊料 L-T 向爲 $da/dn = 1.0579\times10^{-9}(\Delta K)^{3.677}$，舊料的裂紋成長速率約比新料快 1.5 倍。

熱風爐設計壓力只有 0.41 MPa，依據 API579 計算殼板所需的最小厚度，遠小於實際厚度。蓄熱室殼板的 MAWP 最小爲 1.49 MPa，爲設計壓力的 3 倍以上；殼板膜應力 123 MPa 爲最高，對應舊殼板 250 MPa 的降伏強度，應有 2 倍的安全係數。經歷 32 年的使用，殼板主要的腐蝕劣化型態爲局部腐蝕、熱點與應力腐蝕。一旦因施工不良、材料缺陷、腐蝕等因素，誘發殼板裂紋，可依據裂紋穩定成長方程式，估算它的裂紋成長速率。

參考文獻

1. Applied Fracture Mechanic, TALAT Lecture 2403.03.10.

收到日期：2010 年 8 月 20 日
修訂日期：2010 年 12 月 26 日
接受日期：2010 年 12 月 10 日